第39卷 第5期
2022年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 5
Sep. 2022

气候变化背景下中亚干旱区大气水分循环要素时空演变

高 洁[1,2]， 赵 勇[1]， 姚俊强[2]， 迪丽努尔·托列吾别克[2]， 王梦园[3]

（1. 成都信息工程大学大气科学学院，四川 成都 610225；2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/中国气象局树木年轮理化研究重点实验室/新疆树木年轮生态实验室，新疆 乌鲁木齐 830002；3. 中山大学大气科学学院，广东 广州 510275）

摘 要：基于再分析资料，系统分析了1979—2018年中亚干旱区大气水汽含量、水汽收支、降水量、实际蒸发量等水分循环要素的时空变化特征。结果表明：(1) 中亚水分循环要素空间差异明显，降水量和实际蒸发量在天山和帕米尔等山区及周边绿洲区为高值区，荒漠平原地区为低值区，而大气水汽含量相反。(2) 1979—2018年中亚水汽含量呈微弱的减少趋势，变化速率区域差异明显，咸海周边区域明显减少，而新疆大部和天山山区明显增加；中亚地区水汽输送以纬向输送为主，经向输送相对较弱，不同区域水汽收支和变化有较大差异，其中西边界和北边界水汽输送减少，东边界和南边界水汽输送增加；水汽收支在中亚西北部、中亚南部、帕米尔高原和天山山区呈增加趋势，而中亚北部和新疆大部有减少趋势。(3) 与水汽输送变化的表现不同，1979—2018年中亚降水量有增加趋势，为4.14 mm·(10a)$^{-1}$，且年际波动较大，显著增加趋势分布在中亚北部、新疆大部和天山山区，而在中亚西北部和南部有明显减少趋势。(4) 中亚实际蒸发量有微弱的增加趋势，在中亚北部、天山山区和帕米尔高原有明显增加，而在里咸海、中亚南部和新疆南部干旱地区明显减少。从季节来看，各水分循环要素季节变化与年变化时空分布特征基本一致。研究成果有助于进一步了解中亚干旱区大气水分循环演变及机理。

关键词：中亚干旱区；水分循环；水汽含量；降水量；实际蒸发量；水汽收支

中亚干旱区位于欧亚大陆腹地，是全球最大的非地带性干旱区，也是我国天气气候的上游关键区，对我国西北部及东部地区的灾害性天气发生以及区域气候变化具有重要影响[1]。中亚干旱区水资源短缺问题突出，可利用的淡水资源仅占很少一部分[2]。中亚各国之间水土资源基本表现为上游国家匹配状况优于下游国家。中亚干旱区生态环境脆弱，是对全球气候变化最敏感的地区之一[3-4]。降水是陆地一切水资源的来源，它可以看作是一个地区水资源的上限值[5]。水汽则是产生降水的首要条件，降水过程离不开水汽和能量的积累，抓住了水汽这一物质基础，就抓住了问题的关键[6]。

中亚干旱区山盆地形复杂，南部受诸多大山阻挡，暖湿气流难以深入，来自大西洋和北冰洋的微弱湿冷水汽由高空西风带携带输送至此，形成了中亚地区明显的"西风模态"特征[7-8]。学者们基于不同干旱指标评估全球陆地干湿变化，认为全球陆地正在快速干旱化，分析发现中亚区域气候有变干的趋势，特别是中亚中部及南部干旱化趋势明显[9-11]。全球气候变暖会直接影响区域水循环的稳定性，也会引发径流补给方式和水资源数量的改变，从而加大了水资源时空分布的不确定性[12-14]。气候变化和人类活动也造成了中亚地区湖泊水位下降、面积收缩以及水质恶化等问题[15]。随着全球气温升高，干旱区大气水循环过程加剧，降水量和蒸发量均明显增加，从而引起水循环结构及分布发生变化[16-17]。

降水、蒸发和水汽输送是水循环过程的大气分支，它们决定着一个区域的水资源总量[18-19]。中亚

收稿日期：2022-02-17； **修订日期：**2022-04-18
基金项目：国家自然科学基金(41875102，U1903113)；四川省科技厅项目(2020JDJQ0050)；中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(IDM2021006)
作者简介：高洁(1997-)，女，硕士研究生，主要从事干旱区水循环研究. E-mail: gaojie997827@163.com
通讯作者：赵勇. E-mail: zhaoy608@cuit.edu.cn

干旱区水汽含量受到地理纬度、地形高度及大气环流等多方面因素影响，其上空水汽含量较中低纬度地区偏低。关学锋[20]研究发现，中亚干旱区上空的水汽分布主要呈现“南部多，北部少；西部多，东部少；平原多，山区少”的特点。中亚干旱区降水具有复杂性，冷季表现出明显的降水增加[10]。而水汽输送作为水循环过程的重要环节，它能将降水与蒸发过程结合，形成完整的水循环过程，中亚干旱区水汽输送季节性差异显著，冬季水汽从纬向输入而从经向输出，夏季经纬向均为水汽输出[21]。水汽变化会受到多方面因素影响，大尺度大气环流和海拔高程会对干旱区年平均水汽压造成影响[1,22]。

以往研究中多将中亚干旱区作为一个整体，分析降水变化、水汽分布以及水汽输送等特征，其大气水分循环组成要素具有显著的空间差异。本文将中亚干旱区分为8个气候分区，从水汽含量及收支、降水、实际蒸发量三要素的时空演变特征，选用多套再分析资料，探讨大气水分循环结构的区域差异，将有助于深入理解中亚干旱区大气水分循环演变特征，进一步分析中亚干旱区内部水汽输送的影响机制。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文选取的资料有：(1) 全球降水气候学中心(GPCC)提供的1979—2018年月平均降水资料，分辨率为0.25°×0.25°。(2) 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA5 1979—2018年月平均整层水汽含量、实际蒸发量再分析资料，分辨率为0.25°×0.25°。(3) 利用ERA-Interim再分析资料计算1979—2018年中亚各分区边界水汽收支。

有研究表明，ERA5较其他再分析资料更适用于研究中亚地区大气可降水量的时空分布[23]，经过验证GPCC降水量数据在中亚地区的准确性更高，对中亚地区长期降水变化研究的适用性更好[24-25]。ERA-Interim再分析资料是ECMWF基于集成预报系统(Integrated Forecast System, IFS)Cy31r2数值模式制作的再分析资料，其水文资料基于观测资料和预报模式共同得到，数据选择、质量控制、偏差校正和性能监测等技术方面不断改进[26]。虽然，ERA-Interim资料适用性研究相对较少，但其数值预报产品的性能已经得到普遍认可[27-29]。因此，使用ERA-Interim资料来研究水汽输送的分布变化特征具有一定的可信度。综上所述，本文选取ERA5水汽数据、ERA-Interim水汽输送资料和GPCC降水数据进行分析。

1.2 中亚气候分区

中亚干旱区气候类型复杂多样，气候特征迥异。中亚西北部以丘陵、低地为主，根据Köppen气候分类[30]，属于干旱沙漠与干旱草原气候共同作用，年平均气温小于18 ℃，四季降水比较均匀；中亚北部包括哈萨克斯坦中部，下垫面以丘陵为主，该区域年内降水以夏季最高；中亚南部与新疆南部同为沙漠地区，中亚南部的土库曼斯坦和乌兹别克斯坦为类地中海式气候，夏季降水少，但该区域要比新疆南部塔里木盆地湿润。帕米尔-西天山地区地势较高，该区域受到类地中海式气候和高原气候共同作用，降水较多，且以冬、春季降水为主。新疆北部为温带草原气候，该区域降水集中在夏季；天山中段和东段同为山脉但气候相差较大，中天山地区降水较多，而东天山一带非常干旱，多年平均降水量不足100 mm。由于中亚干旱区气候空间差异较大，因此，需要根据不同气候分区进行水分循环结构研究。

本文基于以下要素和特征，对中亚地区进行气候分区(表1)：(1) 使用Köppen气候分类法(考虑1个地区的温度、降水量和植被类型)对气候进行分类[30]，中亚区域气候分类见图1a；(2) 多年平均降水量空间分布及降水年循环特征；(3) 地形地貌特征：分为山脉、沙漠、高原、平原、盆地、丘陵和山谷。经整理后将中亚干旱区划分为8个气候分区(图1b)，分别是中亚西北部(NWCA)、中亚北部(NCA)、中亚南部(SCA)、帕米尔-西天山(PMP)、新疆北部(NXJ)、中天山(CTS)、东天山(ETS)、新疆南部(SXJ)。

2 结果与分析

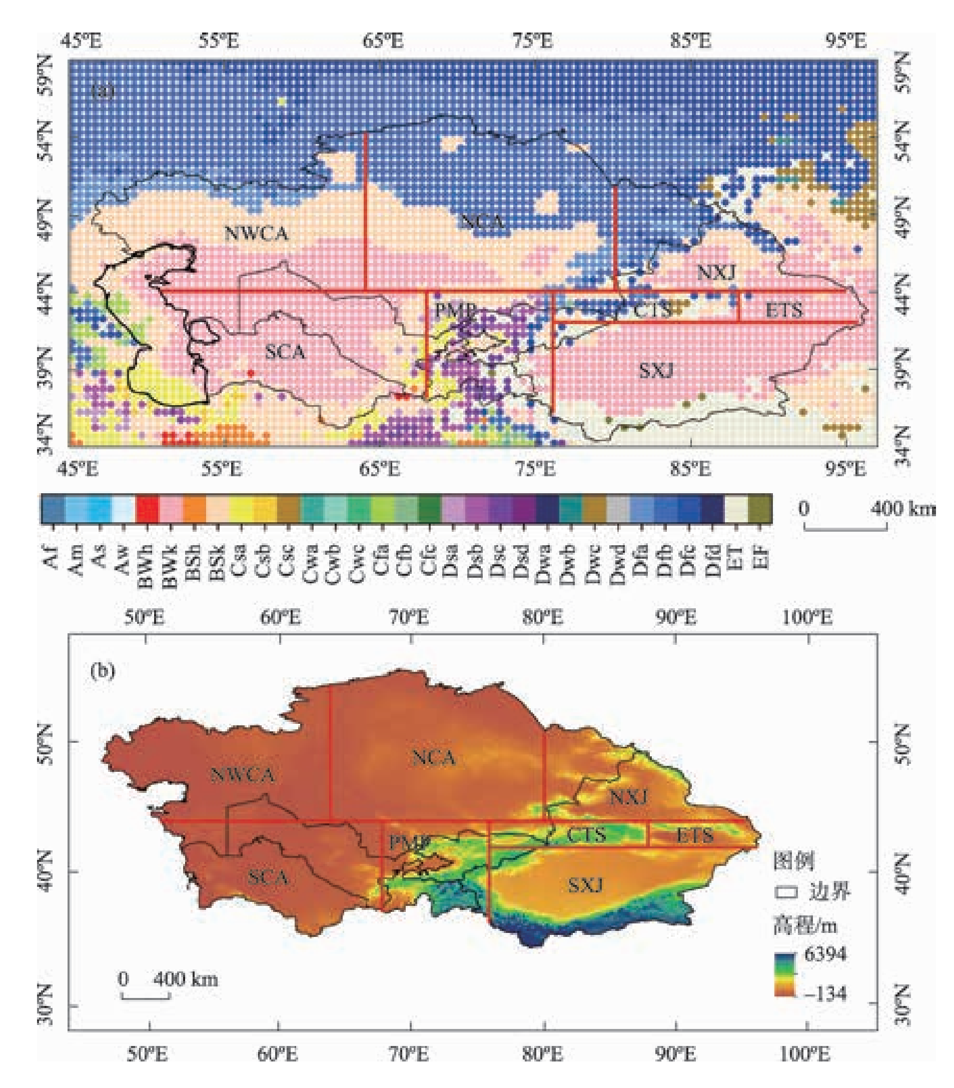
2.1 中亚干旱区水汽含量与水汽收支时空演变

2.1.1 大气水汽含量空间分布与变化特征 中亚干旱区整层大气水汽含量空间差异较大，从西南部的土库曼斯坦向中高纬度东北地区递减(图2a)。受地形影响，天山山脉以及昆仑山山脉一带水汽含量低，均在6 mm以下；里-咸海之间低海拔盆地区域

表1　中亚气候分区及分类标准

Tab. 1　Climatic zoning and classification standard of Central Asia

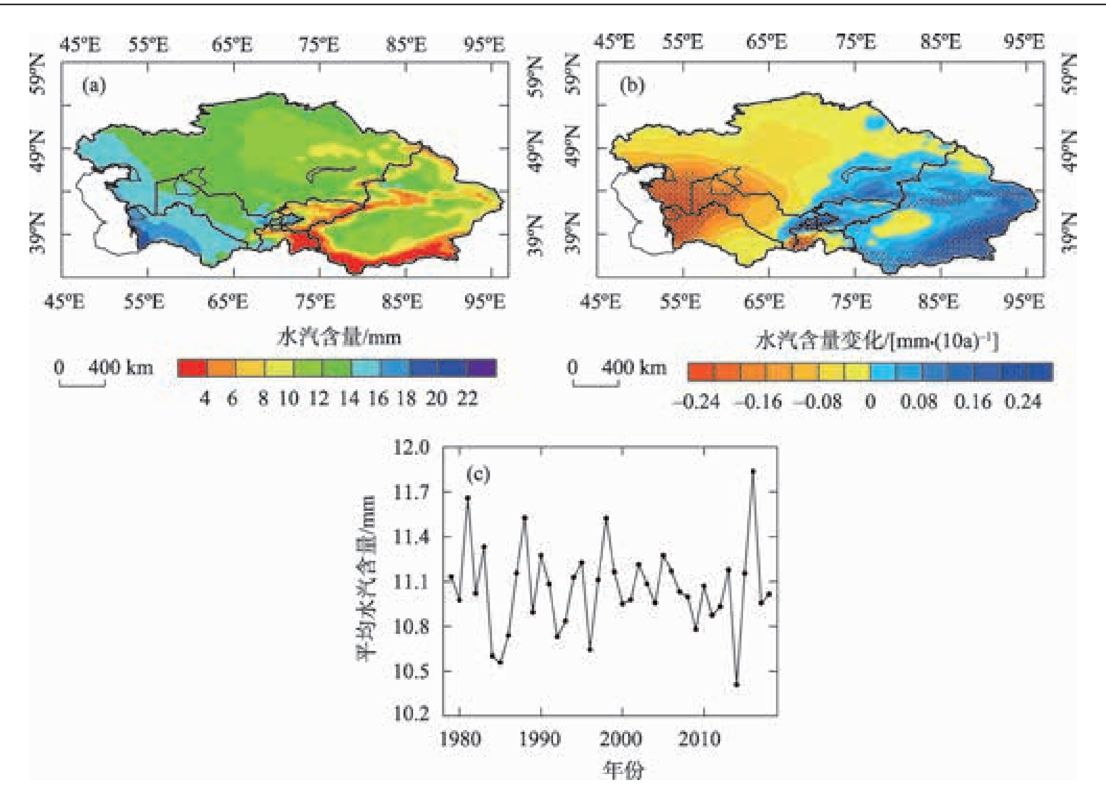
分区	范围	Köppen气候分类主要气候类型	多年平均降水量	气候分类	地貌特征
中亚西北部(NWCA)	44°~52°N, 48°~64°E	Dry-steppe-cold(BSk), Dry-desert-cold(BWk)	200 mm<*P*<250 mm	西风带气候	丘陵、低地
中亚北部(NCA)	44°~54°N, 64°~80°E	Snow-Subarctic-warm summer(Dfb)	200 mm<*P*<250 mm	西风带气候	丘陵
中亚南部(SCA)	36°~44°N, 52°~68°E	Dry-desert-cold(BWk)	150 mm<*P*<200 mm	类地中海式气候	沙漠、平原
帕米尔-西天山(PMP)	36°~44°N, 68°~76°E	Snow-humid-warm summer(Dsb)	*P*>300 mm	类地中海式气候和高原气候	高原、山脉、山谷
新疆北部(NXJ)	44°~50°N, 80°~92°E	Dry-desert-cold(BWk), Dry-steppe-cold(BSk)	200 mm<*P*<250 mm	温带草原气候	山脉、盆地
新疆南部(SXJ)	36°~42°N, 76°~92°E	Dry-desert-cold(BWk)	*P*<100 mm	温带沙漠气候	盆地、沙漠
中天山(CTS)	42°~44°N, 76°~88°E	Snow-subarctic-warm summer(Dfb), Polar-tundra(ET), Polar-ice cap(EF)	300 mm<*P*<350 mm	高原气候	山脉
东天山(ETS)	42°~44°N, 88°~95°E	Dry-desert-cold(BWk)	*P*<100 mm	高原气候	山脉



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2021)5443号,对底图边界无修改。下同。

图1　中亚干旱区Köppen气候类型的空间分布(a)、中亚地区气候分区(b)

Fig. 1　Spatial distribution of Köppen climate type in arid region of Central Asia(a), climate zoning in Central Asia(b)



注:阴影部分表示通过0.05的显著性检验。下同。

图2 1979—2018年中亚地区平均水汽含量分布(a)、变化趋势(b)、平均水汽含量年际变化(c)

Fig. 2 Average water vapor content distribution (a), change trend (b), inter-annual variation (c) in Central Asia, 1979–2018

水汽含量高,超过14 mm。从变化趋势来看(图2b),1979—2018年中亚整层水汽含量呈微弱的减少趋势,为-0.01 mm·(10a)$^{-1}$,不同地区变化速率差异明显,以巴尔喀什湖西侧至乌兹别克斯坦东南部山区为界,两侧水汽含量总体表现为“东增西减”的反向变化,里-咸海之间水汽含量减少最为显著,达到-0.2 mm·(10a)$^{-1}$以下,而新疆南部昆仑山及天山山区水汽含量则显著增加。1979—2018年中亚整层大气水汽含量以年际变化为主(图2c),变化趋势不显著,2000—2013年水汽含量变化波动较小,但在2015年前后波动增大。

从中亚各分区水汽含量的分布来看(表2),中亚南部水汽含量最高,其次是中亚西北部和北部,而中天山、新疆南部和帕米尔-西天山区域水汽含量较低。从变化趋势来看,中亚前3个区水汽含量均呈减少趋势,中亚南部水汽含量减少趋势最大,为-0.12 mm·(10a)$^{-1}$,其他分区水汽含量均呈不同程度的增加趋势,其中东天山水汽增加趋势最大,为0.10 mm·(10a)$^{-1}$,其次是新疆南部和东天山。

图3展示了中亚地区1979—2018年整层水汽

表2 1979—2018年中亚及其各分区整层大气水汽含量和变化趋势

Tab. 2 Atmospheric water vapor content and variation trend in Central Asia and its subregions, 1979–2018

分区	平均水汽含量/mm	变化趋势/[mm·(10a)$^{-1}$]
中亚	11.0	-0.01
中亚北部	11.6	-0.02
中亚西北部	13.7	-0.09
中亚南部	15.0	-0.12
帕米尔-西天山	8.6	0.01
新疆北部	9.2	0.01
新疆南部	8.4	0.08
中天山	8.2	0.07
东天山	9.5	0.10

的季节分布和变化趋势,中亚地区大气水汽含量呈现“夏多冬少、春秋相似”的分布特征,受地形作用影响,山地的水汽含量显著低于盆地地区。大气水汽含量包含了水蒸气、液态水、云冰、雨和雪,从地球表面到大气层顶空气柱内的总和。在平原、河谷和盆地地区,空气柱较厚,大气水汽含量值较大;在高原山地地区,地形较高,空气柱较薄,大气水汽含

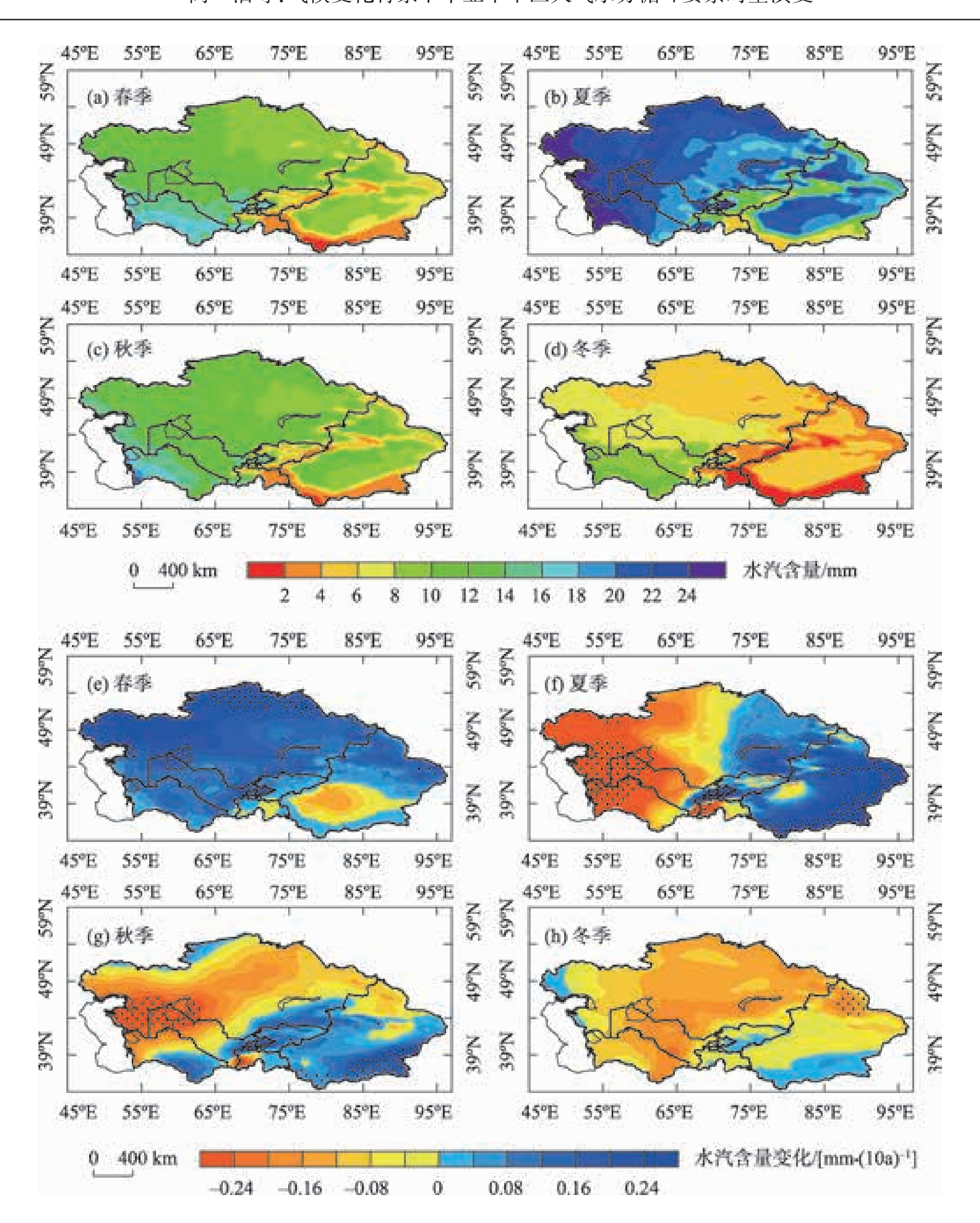


图3　1979—2018年中亚地区春季(a、e)、夏季(b、f)、秋季(c、g)、冬季(d、h)整层大气平均水汽含量分布及变化趋势

Fig. 3　Distribution and variation trend of the whole atmospheric water vapor content in Central Asia in spring (a, e), summer (b, f), autumn (c, g), winter (d, h), 1979−2018

量值较小,这与石晓兰等[27]的研究结果一致。虽然,山区水汽含量低于平原,但水汽能否产生降水,其动力条件是至关重要的。对于干旱区来说,降水转化率在山区高于盆地,因此形成了降水量和蒸发量与大气水汽含量相反的分布特征[31]。春季和秋季绝大部分地区水汽含量在8~16 mm之间(图3a和图3c),而夏季水汽含量则明显高于其他季节(图3b),除地势较高的山区外,中亚其余地区水汽含量均可达16 mm以上,特别是中亚西部里海沿岸附近区域,整层大气水汽含量超过24 mm。与夏季由西向东递减的分布特征不同,在冬季(图3d)中亚西北部、北部及南部水汽含量表现为由低纬度向高纬度递减,而新疆地区水汽含量减少到6 mm以下,比上述地区更低。

由研究区整层水汽的季节变化分析可知(图3e~图3h),中亚地区不同季节水汽变化速率存在明显差异。春季中亚大部分地区整层水汽含量以增加为主,而新疆南部水汽有微弱的减少趋势(图

3e)；冬季则以减少为主，新疆北部阿尔泰山区域减少趋势显著(图3h)。夏季中亚地区水汽变化以70°E为界(图3f)，基本表现为“东增西减”的趋势，显著减少区域位于里-咸海之间，昆仑山北侧、天山山区增加趋势显著。秋季水汽呈“南增北减”趋势(图3g)，里-咸海区域显著减少，更低纬的新疆南部水汽含量增加，其中巴尔喀什湖北部以及新疆北部水汽含量由夏季增加趋势转为秋季减少趋势。中亚西部地区水汽主要由中纬度的盛行西风输送，且与中亚深低槽有关，而新疆地区还会受到多种季风环流形势影响[32-34]。在20世纪80年代，区域西风指数出现减弱趋势，由西风系统携带输送至中亚的水汽明显减弱，可能造成中亚西部水汽减少趋势[35]。而西风减弱有利于东亚季风、印度季风输送水汽至新疆地区，秋季季风爆发相对于夏季更弱，新疆地区秋季水汽相较于夏季可能出现减少的趋势。

2.1.2　水汽收支变化特征　根据中亚气候分区，分别对各分区边界水汽收支进行分析，讨论各分区水汽收支及变化差异。整体来看，中亚地区纬向水汽输送大于经向，西边界为主要水汽输入，南边界水汽输入相对较弱，北边界水汽输出弱于东边界。

中亚各分区水汽收支来看(图4)，研究区水汽以纬向输送为主，不同区域收支和变化有较大差异。中亚西北部为多年平均水汽汇区，水汽净收支为0.59×10⁹ kg·s⁻¹，东边界水汽输出量小于西边界西风输入；南边界水汽输入量小于北边界输出，全年平均为水汽辐合区，多年水汽输入有减少趋势。中亚北部地区以纬向水汽输送为主，经向输送较弱，各边界水汽收支总量基本相当。与上述两区不同，中亚南部为多年平均水汽源区，纬向水汽输送有减少趋势；南北边界均为增加趋势的水汽输出。帕米尔-西天山地区西、南边界水汽输入量高于东、北边界输出量，整体来看该地区为弱增加趋势的水汽辐合区。新疆北部和中天山地区均为仅西边界输入的水汽源区，不同的是新疆北部以纬向输送为主，中天山经向输出更强。东天山地区多年平均水汽净收支为-0.25×10⁹ kg·s⁻¹，全年平均为水汽辐散区，经向水汽输送大于纬向，西、北边界水汽输入减少，东、南边界的水汽输出增加，形成了该地区多年水汽辐散的减少趋势。新疆南部表现有所不同，除东边界外均为水汽输入，由于输入减少，而东边界输出增加，多年水汽辐合有减少趋势。

2.2　中亚干旱区降水时空演变

2.2.1　降水的空间分布　中亚地区年降水量空间分布极不均匀(图5a)，多年平均降水量为265.2 mm(表3)，其中新疆南部、中亚南部少于100 mm。帕米尔-西天山出现降水量大值中心，局部超过550 mm，远高于其他地区。中天山地区年降水量仅次于帕米尔-西天山，接着是中亚北部、新疆北部和中亚西北部，均大于200 mm，而新疆南部的沙漠地区降水稀少，多年平均降水量仅为67.5 mm。

不同地区降水量的季节差异明显(图6a~图6d)。帕米尔-西天山地区降水以冬季和春季为主，高于其他地区。降水量最低值夏季位于中亚南部，

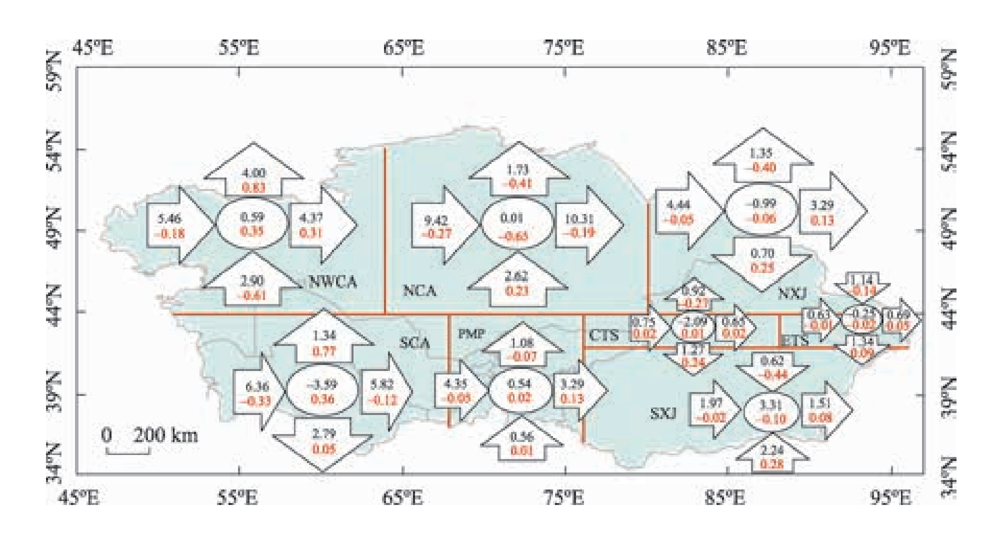


图4　1979—2018年中亚各分区边界水汽收支(黑色，单位：10^9 kg·s^{-1})及水汽收支变化[红色，单位：10^9 kg·s^{-1}·$(10a)^{-1}$]

Fig. 4　Schematic diagram of water vapor budget (black, unit: 10^9 kg·s^{-1}) and water vapor budget change [red, unit: 10^9 kg·s^{-1}·$(10a)^{-1}$] at the boundary of each subregion in Central Asia, 1979–2018

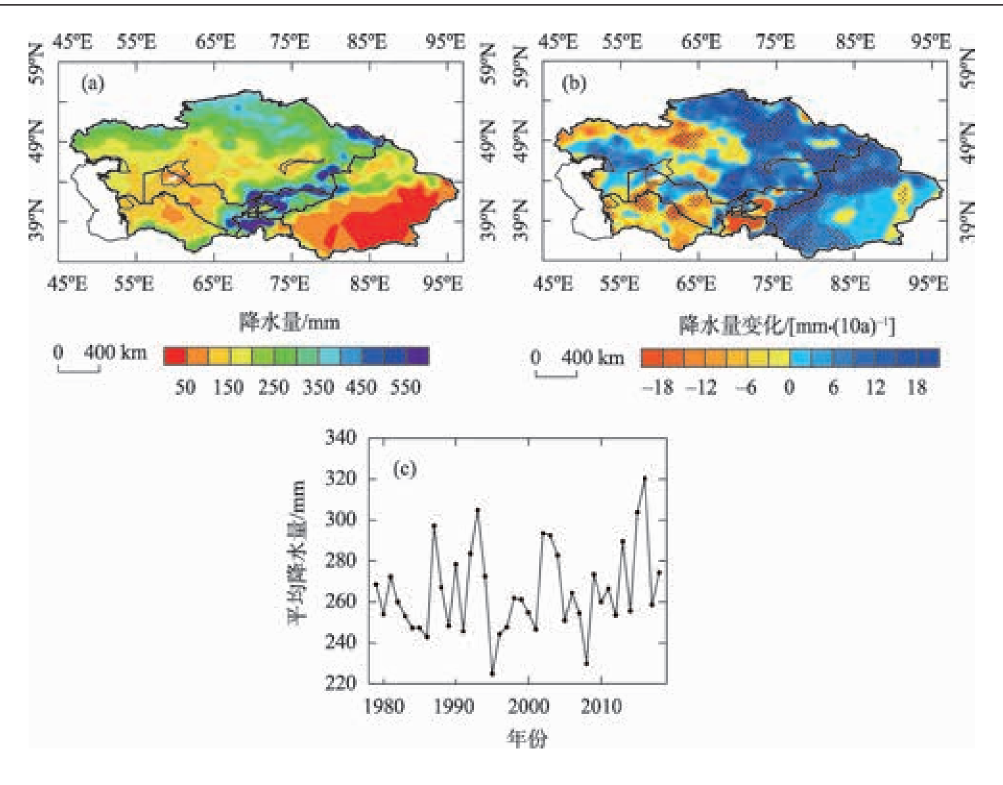


图5　1979—2018年中亚地区平均降水量分布(a)、变化趋势(b)、平均降水量变化(c)

Fig. 5　Average precipitation distribution (a), change trend (b), average precipitation change (c) in Central Asia, 1979−2018

表3　1979—2018年中亚及各分区平均降水量和变化趋势

Tab. 3　Average precipitation and variation trend in Central Asia and its subregions, 1979−2018

分区	平均年降水量/mm	变化趋势/[mm·(10a)$^{-1}$]
中亚	265.2	4.14
中亚北部	248.1	7.57
中亚西北部	205.9	−2.37
中亚南部	182.3	−4.01
帕米尔−西天山	353.4	1.80
新疆北部	234.6	10.15
新疆南部	67.5	5.43
中天山	316.2	12.99
东天山	78.7	2.74

其他三季位于新疆南部。新疆北部和中亚北部以夏季降水为主,两地区春、秋季降水分布相似,冬季最少。中亚西北部降水量随纬度增加而增加,特别在夏季表现十分明显。

2.2.2　降水的时间变化　1979—2018年中亚地区降水量有微弱的增加趋势[4.14 mm·(10a)$^{-1}$],年际波动较大,在2000年后呈现波动中缓慢上升的趋势(图5c)。图5b展示了中亚地区降水变化速率,中亚西北部和南部降水量整体呈现减少趋势。其余地区以增长趋势为主,其中中天山地区增加最大,达到12.99 mm·(10a)$^{-1}$。

不同季节降水变化情况也存在差异。中亚大部分地区春季降水为增加趋势,中亚南部以及帕米尔−西天山区域降水减少(图6e)。夏季降水减少地区近一步扩大到中亚西北部,但通过显著性检验的地区较少,而新疆北部和中天山以及塔里木盆地西部降水增长较大(图6f)。秋季(图6g)中亚西北部、帕米尔−西天山以及东天山降水减少,显著区位于哈萨克斯坦的图尔盖高原,其余各地以增加趋势为主。冬季(图6h)中亚西北部、新疆以及巴尔喀什湖附近地区降水增加,其余各地呈减少趋势。

2.3　中亚干旱区实际蒸发量时空演变

2.3.1　实际蒸发量的空间分布　蒸发是水循环要素的重要组成部分。图7a给出了1979—2018年中亚地区平均蒸发量的空间分布,各分区实际蒸发量有较大差异,中亚北部蒸发量高于中亚南部,中亚西北部最高,多年平均蒸发量超过400 mm(表4),可能与该区下垫面湖泊有关。帕米尔−西天山地区蒸发量高于周围区域,部分地区在400 mm以上。受地形作用,高蒸发区主要位于山区两侧的绿洲地带和河流湖泊周边区域,新疆地区山脉两侧蒸发量高于盆

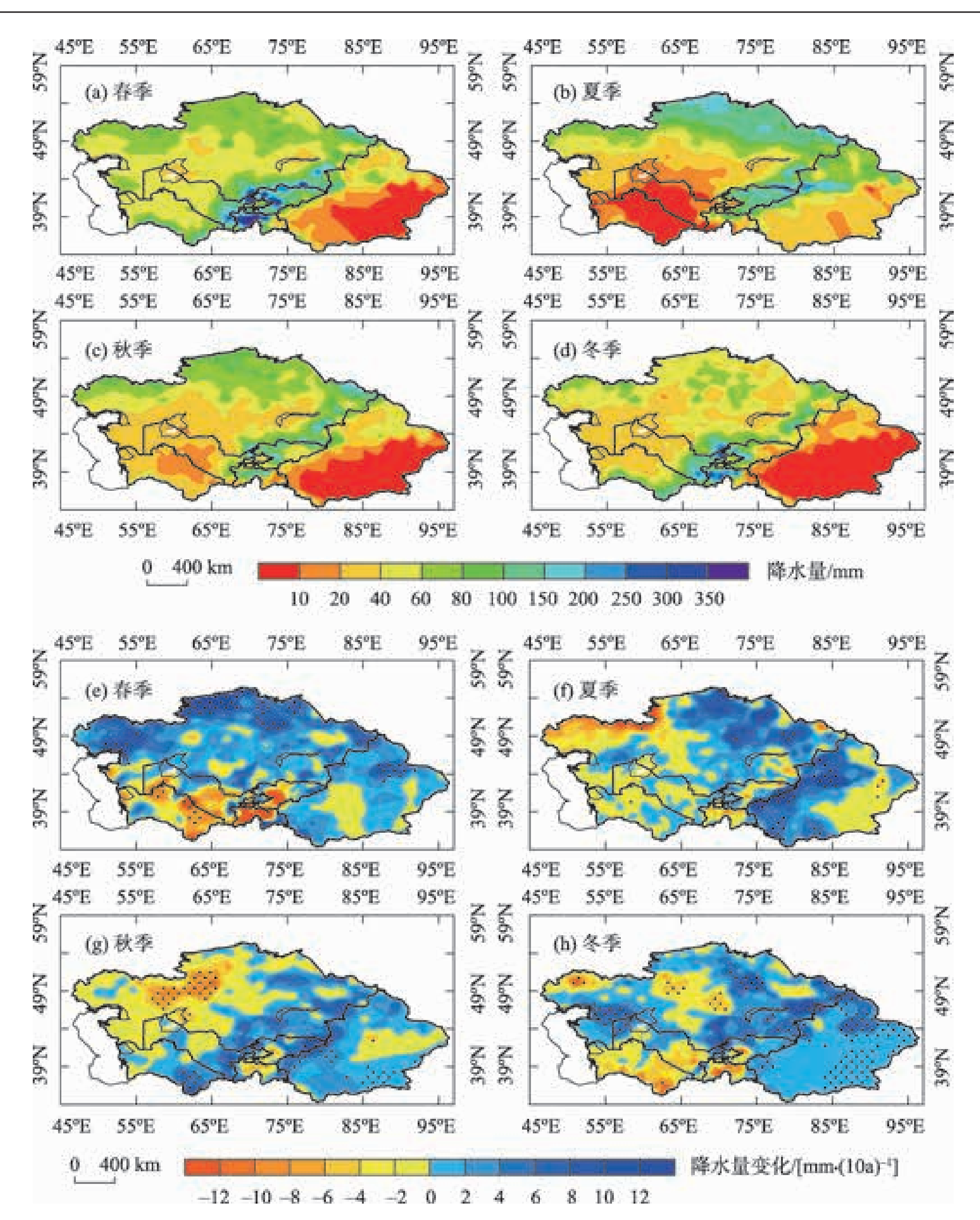


图6 1979—2018年中亚地区春季(a、e)、夏季(b、f)、秋季(c、g)、冬季(d、h)平均降水量分布和平均降水量变化趋势

Fig. 6 Distribution and variation trend of average precipitation in Central Asia in spring (a, e), summer (b, f), autumn (c, g), winter (d, h), 1979−2018

地地区,塔里木盆地东侧极端干旱区蒸发量不足50 mm。

中亚蒸发主要以夏季为主,春、秋次之,冬季最少。春季(图8a)蒸发以帕米尔-西天山一带最多,中亚北部、西北部蒸发量高于中亚南部。新疆北部蒸发量高于新疆南部,新疆南部盆地蒸发量低于20 mm。由图8b所示,夏季新疆北部山区、中天山和帕米尔-西天山蒸发量最高可达240 mm以上,中亚南部及新疆盆地蒸发量较低。秋季(图8c)蒸发量略低于春季,但空间分布类型与春季相似。中亚地区冬季(图8d)蒸发量明显低于其他三季,除中亚南部,其余各地区蒸发量小于20 mm。

2.3.2 实际蒸发量的变化特征 中亚地区蒸发量整体为微弱的增加趋势[2.11 mm·(10a)$^{-1}$],自西向东为“负-正-负”的变化趋势(图7b)。中亚西北部蒸发为减少趋势并通过了95%的显著性检验,中亚南部蒸发量增加;中亚北部增加趋势达到8.63 mm·(10a)$^{-1}$。新疆地区蒸发量整体为减少趋势,新疆南

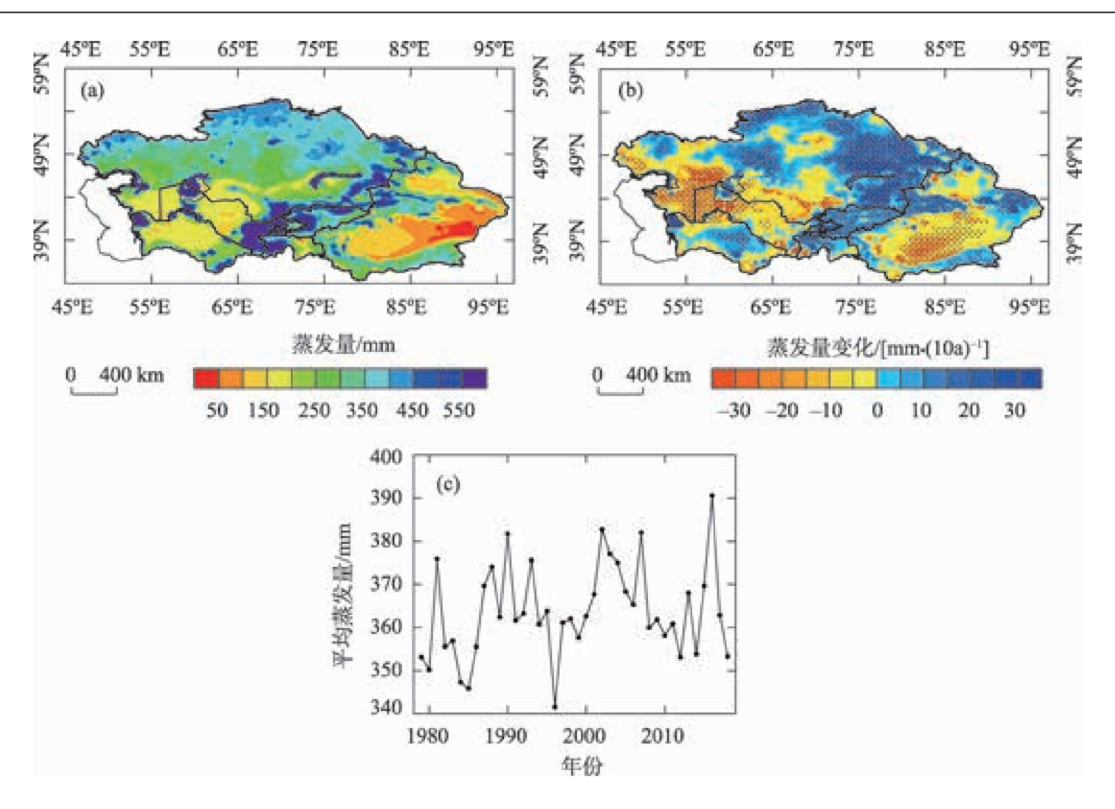


图7　1979—2018年中亚地区平均蒸发量分布(a)、变化趋势(b)、平均蒸发量变化(c)

Fig. 7　Average evaporation distribution (a), change trend (b), average evaporation change (c) in Central Asia, 1979−2018

表4　1979—2018年中亚及其各分区平均蒸发量和变化趋势

Tab. 4　Average evapotranspiration and variation trend in Central Asia and its subregions, 1979−2018

分区	平均年蒸发量/mm	变化趋势/[mm·(10a)$^{-1}$]
中亚	363.7	2.11
中亚北部	346.2	8.63
中亚西北部	403.6	0.26
中亚南部	358.0	−3.32
帕米尔-西天山	399.0	3.06
新疆北部	315.3	5.70
新疆南部	201.2	−4.21
中天山	386.4	11.09
东天山	185.2	8.72

部减少显著。中天山以及东天山蒸发量显著增加，分别为11.09 mm·(10a)$^{-1}$、8.72 mm·(10a)$^{-1}$。

中亚各地区蒸发量在不同季节变化趋势也存在差异。由图8e~图8h所示，中亚西北部蒸发量在夏、秋季减少，冬、春季增加；中亚北部冬、春季为显著增加趋势，该区蒸发量减少的范围在秋季进一步扩大；中亚南部蒸发量整体表现为减少趋势，不同的是，土库曼斯坦仅在冬季为减少趋势；帕米尔-西天山一带蒸发变化在春、夏、秋三季均趋于增加，而冬季该地区东部蒸发量减少。新疆北部蒸发负增长趋势则在夏季表现最为明显。中天山和东天山四季蒸发变化基本为正。除冬季外，新疆南部蒸发均表现为显著减少趋势。塔里木盆地西南部蒸发变化在冬季表现为减少趋势，而塔里木河及东北部的南疆则表现为显著增加趋势。实际蒸发量是控制水汽再循环的主导变量，因此，中亚实际蒸发量变化主要受到降水变化控制[36]。降水可以直接影响地表土壤湿度，从而影响实际蒸发量，新疆南部冬季多年平均降水量表现为增加趋势，其他三季均存在不同程度减少趋势。此外，实际蒸发量受下垫面条件作用较大，塔里木河流域土壤湿度及地表覆盖状况改变，也可能会使冬季塔里木河及其东北部蒸发量表现为增加趋势。

2.4　中亚干旱区大气水分循环结构

由图9可知，1979—2018年中亚不同地区大气水分循环有较大差异。中亚地区大气水汽含量高值区位于平原盆地，地势较高的山区为低值区，而降水量与蒸发量表现相反。荒漠盆地地势低，空气柱较高原山地地区厚，因此水汽含量较高。由于缺乏动力条件，盆地的降水转化率低于山区，形成了中亚干旱区降水量和蒸发量分布不同于大气水汽

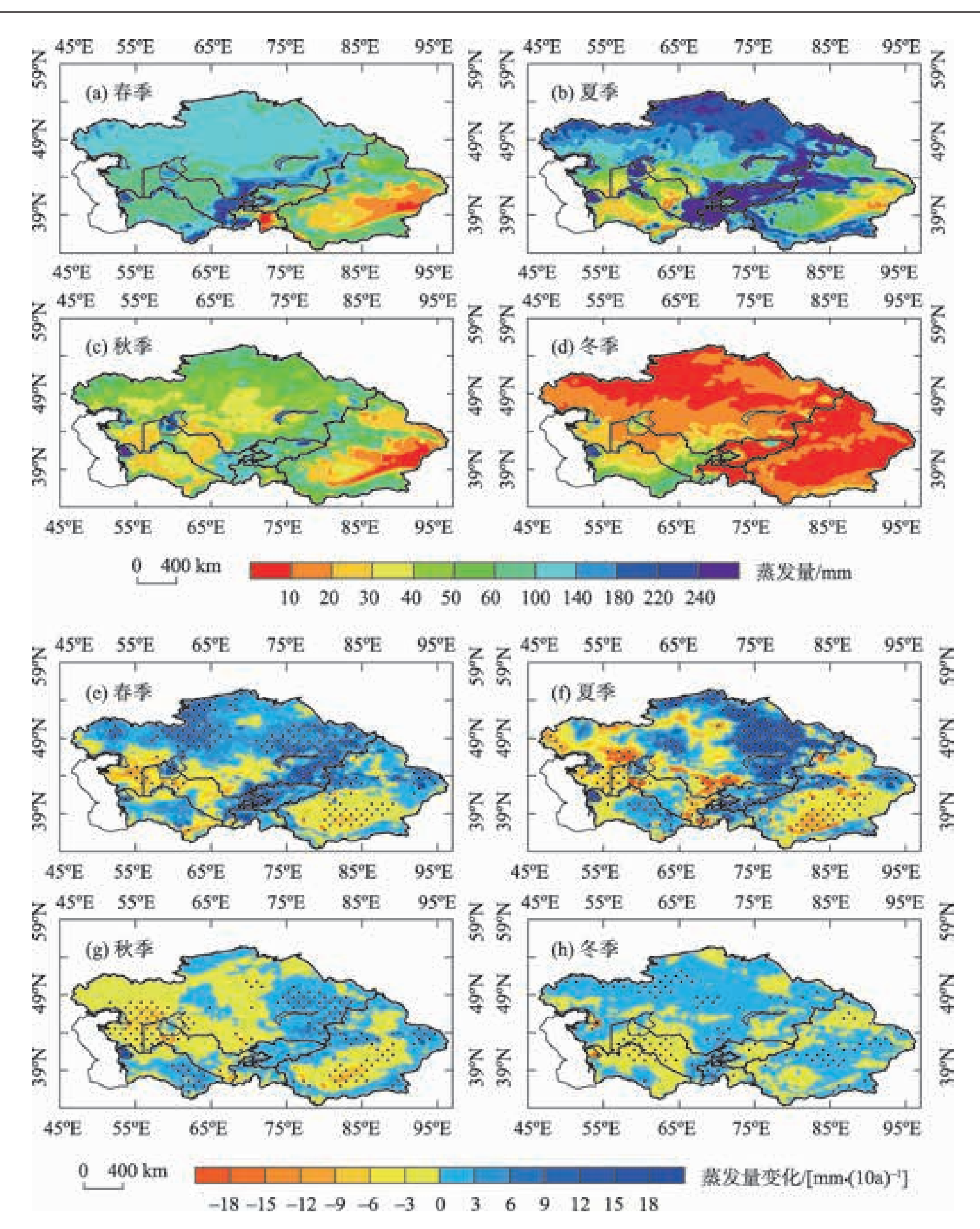


图8 1979—2018年中亚地区春季(a、e)、夏季(b、f)、秋季(c、g)、冬季(d、h)平均蒸发量分布和平均蒸发量变化趋势

Fig. 8 Distribution and variation trend of average evaporation in Central Asia in spring (a, e), summer (b, f), autumn (c, g), winter (d, h), 1979−2018

含量的特征。

中亚西北部地区多年平均大气水汽含量为13.7 mm,高于中亚其他大部分地区水汽含量,中亚西北部年输入水汽量小于年输出水汽量,年地表蒸发量最高,达到了403.6 mm,年降水量约为年地表蒸发量的一半,里海沿岸低地较为湿润的下垫面,为该区域蒸发量增加提供了有利条件;中亚北部地区大气水汽含量低于中亚西北部,年输入水汽量与年输出水汽量的值相当,且均高于中亚西北部地区,中亚北部年降水量为248.1 mm,年地表蒸发量比年降水量大约多100 mm;中亚南部地势较低,大气水汽含量在中亚地区最高,为15.0 mm,年输入水汽量低于年输出水汽量,年降水量仅为年地表蒸发量的一半,为182.3 mm。该地区下垫面多为沙漠,存在降水减少、蒸发量增加的问题,特别是在土库曼斯坦中东部,由干旱引起的植被和土地退化流失现象,加剧了该地区的降水需求,更不利于该地区水分循环[37]。帕米尔-西天山地区降水量相对丰

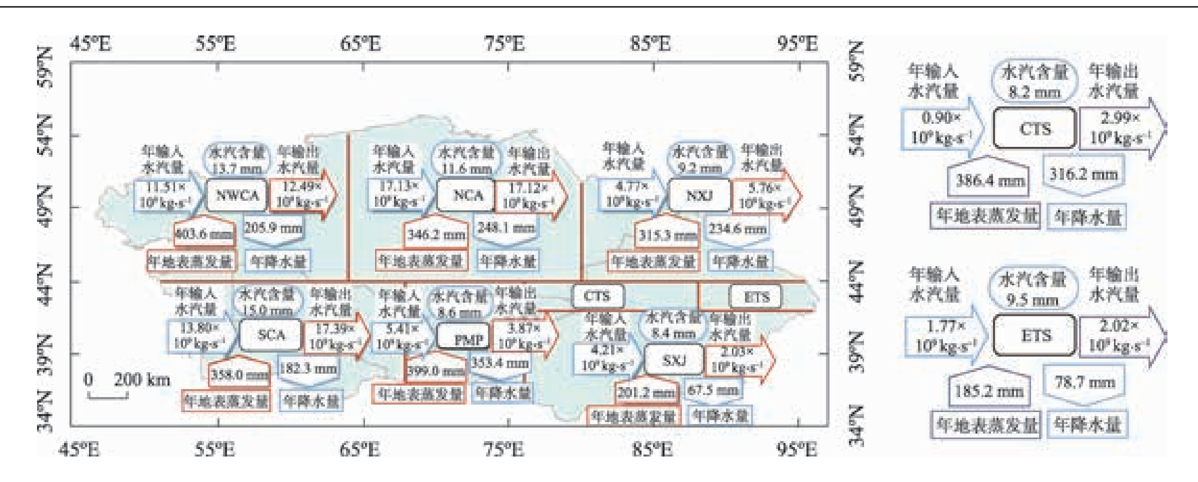


图9　中亚各分区大气水循环示意图

Fig. 9　Map of atmospheric water cycle in the subregions of Central Asia

富,多年平均降水量超过了350 mm,大气平均水汽含量为8.6 mm,水汽输送量明显低于前3个地区,其年地表蒸发量和年降水量相差较小。冰川是中亚地表径流的重要来源,帕米尔–西天山作为中亚干旱区重要的水源地,其冰川退缩通过影响地表径流对局地大气水分循环过程造成极为不利的影响[38]。

新疆地区位于中亚西风带的下游,大气中水汽含量低于上游地区,其水汽受多种季风环流形势影响,多年水汽输送量不及中亚其他地区[33];新疆北部多年大气水汽含量为9.2 mm,大气水汽输送量级与帕米尔–西天山地区相当,新疆北部的年输入水汽量小于年输出水汽量,年地表蒸发量比年降水量大约多80 mm;中天山和东天山地区水汽输送量均相对较低,中天山地区年输入水汽量仅为0.90×10^9 kg·s^{-1},说明局地水汽再循环对于该地区降水的贡献可能大于外来水汽输送;中天山地区年地表蒸发量和年降水量均大于300 mm,而东天山地区年蒸发量为185.2 mm,年降水量则不足100 mm;新疆南部大气水汽含量较低,约为8.4 mm,年输出水汽量约为输入量的一半,年蒸发量可达201.2 mm,而年降水量非常小,仅为67.5 mm,这个值远低于新疆北部;造成南北疆降水量差异较大的现象原因是多方面的。有研究表明,青藏高原春季热力异常通过影响副热带西风急流和南亚高压等大尺度环流及水汽输送,调节新疆北部夏季降水的变化[39];5月青藏高原主体感热偏弱,其西北侧的沙漠感热偏强时,新疆上空盛行偏南风,阿拉伯海上空反气旋性环流配合中亚上空气旋性环流,进一步将热带水汽输送至新疆北部上空,从而造成新疆北部夏季降水偏多[40-41]。

大气增温增湿会增强中亚干旱区大气水分循环,由于中亚不同分区对气候变化的响应不一致,大气水分循环这一过程也受到不同程度的影响。此外,实际蒸发量作为大气水分循环过程的重要组成部分,缺乏观测数据,要素值的估算过度依赖模型等因素,也增加了水分循环结构的不确定性。

3　结 论

中亚干旱区大气水分循环过程独特,大气水汽含量、水汽收支、降水量、实际蒸发量等大气水分循环要素空间分布差异显著,中亚干旱区降水量和实际蒸发量与大气水汽含量具有相反的分布特征,受海拔高度作用影响,天山和帕米尔等山区及周边绿洲区为降水量和实际蒸发量的高值区,而荒漠平原地区为低值区。基于多种再分析资料,分析了中亚大气水分循环要素变化特征,主要结论如下:

(1) 1979—2018年中亚水汽含量变化速率区域差异明显,位于中亚干旱区西部的里–咸海明显减少,而新疆大部和天山明显增加;中亚干旱区水汽输送以纬向输送为主,不同区域水汽收支和变化差异较大,与中亚北部和新疆大部减少趋势不同,中亚西北部、中亚南部、帕米尔和天山山区水汽收支表现为增加趋势。

(2) 中亚干旱区降水量为增加趋势,且年际波动较大,降水量在2000年后增加了3.76%;中亚北部、新疆大部和天山山区增加趋势显著,而中亚北部和南部表现为明显减少趋势。

(3) 中亚实际蒸发量呈微弱增加趋势,显著增

加区域分布在中亚北部、天山山区和帕米尔地区，而在里-咸海、中亚南部和新疆南部干旱地区明显减少。

各水分循环要素季节变化与年变化时空分布特征基本一致。整体来看，中亚干旱区各分区的年地表蒸发量均大于年降水量，造成这种现象的原因可能是多方面的，蒸发量受下垫面条件影响较大，地表径流和植物蒸腾等作用都会对蒸发量产生影响。受监测资料限制，对中亚干旱区大气水分循环及其变化的认识还存在很多不足。此外，在全球变暖的气候变化背景下，中亚地区水循环也会发生一系列变化，气候变化及其对中亚水分循环影响机理还需进一步深入研究。本文仅讨论了中亚干旱区大气水分循环要素的时空演变特征，水分循环各要素之间并非互相独立，各要素之间是如何相互作用的，以及它们对于干旱区大气水分循环的贡献尚无定量分析。在未来的工作中，涉及干旱区内部水汽输送的影响机制，造成干旱区内部水循环显著差异性的根本原因还需加强分析。

参考文献(References)：

[1] 姚俊强, 曾勇, 李建刚, 等. 中亚区域干湿及极端降水研究综述[J]. 气象科技展, 2020, 10(4): 7-14. [Yao Junqiang, Zeng Yong, Li Jiangang, et al. A review of dry-wet climate change and extreme precipitation in Central Asia[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(4): 7-14.]

[2] 郭利丹, 周海炜, 夏自强, 等. 丝绸之路经济带建设中的水资源安全问题及对策[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 114-121. [Guo Lidan, Zhou Haiwei, Xia Ziqiang, et al. Water resources security and its countermeasure suggestions in Building Silk Road Economic Belt[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 114-121.]

[3] 姚海娇, 周宏飞, 苏风春. 从水土资源匹配关系看中亚地区水问题[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 391-395. [Yao Haijiao, Zhou Hongfei, Su Fengchun. Water problems based on spatial matching patterns of water and land resources in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 391-395.]

[4] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 中亚(五国)干旱生态地理环境特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 1-12. [Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun, et al. Arid ecological and geographical conditions in five countries of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(1): 1-12.]

[5] 宫德吉. 雨强、径流和有效水资源[J]. 内蒙古气象, 2001, 1(4): 28. [Gong Deji. Rain intensity, runoff and effective water resources [J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2001(4): 28.]

[6] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 320-322. [Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. Principles and Methods of Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 320-322.]

[7] 汤懋苍, 江灏, 柳艳香, 等. 全球各类旱区的成因分析[J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 1-5. [Tang Maocang, Jiang Hao, Liu Yanxiang, et al. Cause analysis of arid region formation on the world[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(1): 1-5.]

[8] Chen F H, Chen J H, Huang W, et al. Westerlies Asia and monsoonal Asia: Spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 192: 337-354.

[9] Lian X, Piao S, Chen A, et al. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(4): 232-250.

[10] 闫昕旸, 张强, 张文波, 等. 泛中亚干旱区气候变化特征分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 1-11. [Yan Xinyang, Zhang Qiang, Zhang Wenbo, et al. Analysis of climate characteristics in the Pan-Central-Asia arid region[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 1-11.]

[11] Hu Z, Chen X, Chen D, et al. "Dry gets drier, wet gets wetter": A case study over the arid regions of central Asia[J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(2): 1072-1091.

[12] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 18-26. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountians, Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 18-26.]

[13] Zou S, Jilili A, Ding J L, et al. Description and attribution analysis of the 2017 spring anomalous high temperature causing floods in Kazakhstan[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2020, 98(6): 1353-1368.

[14] Zou S, Duan W L, Nikolaos C, et al. An extreme rainfall event in summer 2018 of Hami city in eastern Xinjiang, China[J]. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(6): 795-803.

[15] 姚俊强, 杨青, 毛炜峄, 等. 气候变化和人类活动对中亚地区水文环境的影响评估[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 222-230. [Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Evaluation of the impacts of climate change and human activities on the hydrological environment in Central Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 222-230.]

[16] Narisma G T, Foley J A, Licker R, et al. Abrupt changes in rainfall during the twentieth century[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(6): 710-714.

[17] Guo Y, Wang C. Trends in precipitation recycling over the Qinghai-Xizang Plateau in last decades[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517: 826-835.

[18] 罗勇, 姜彤, 夏军, 等. 中国陆地水循环演变与成因[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 18-19. [Luo Yong, Jiang Tong, Xia Jun, et al. Evolution and Causes of Land Water Cycle in China[M]. Beijing:

Science Press, 2017: 18−19.]

[19] Eltahir E, Bras R L. Precipitation recycling[J]. Reviews of Geophysics, 1996, 34(3): 367−378.

[20] 关学锋. 中亚及中国干旱区水汽分布、输送特征及其影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2015. [Guan Xuefeng. Spatial and Temporal Distribution and Transport Characteristics of Water Vapor and Its Effects Over Central Asia and the Arid Region of China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.]

[21] 徐栋, 李若麟, 王澄海. 全球变暖背景下亚非典型干旱区降水变化及其与水汽输送的关系研究[J]. 气候与环境研究, 2016, 21 (6): 737−748. [Xu Dong, Li Ruolin, Wang Chenghai. Characteristics of precipitation changes and relationships with water vapor transport in typical arid regions of Asia and Africa under global warming[J]. Climatic and Environmental Research, 2016, 21(6): 737−748.]

[22] Yao J Q, Chen Y N, Yang Q. Spatial and temporal variability of water vapor pressure in the arid region of northwest China, during 1961−2011[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2016, 123(3): 683−691.

[23] Jiang J, Zhou T, Zhang W. Evaluation of satellite and reanalysis precipitable water vapor data sets against radiosonde observations in Central Asia[J]. Earth and Space Science, 2019, 6(7): 1129−1148.

[24] Dilinuer T, Yao J Q, Chen J. Systematical evaluation of three gridded daily precipitation products against rain gauge observations over Central Asia[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 2296−6463.

[25] Hu Z Y, Zhou Q M, Chen X, et al. Evaluation of three global gridded precipitation data sets in central Asia based on rain gauge observations[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(9): 3475−3493.

[26] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553−597.

[27] 石晓兰, 杨青, 姚俊强, 等. 基于 ERA-Interim 资料的中国天山山区云水含量空间分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(2): 50−56. [Shi Xiaolan, Yang Qing, Yao Junqiang, et al. The spatial distribution of water vapor and cloud water content over Tianshan mountains, China based on ERA-Interim dataset[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(2): 50−56.]

[28] 林厚博, 游庆龙, 焦洋, 等. 青藏高原及附近水汽输送对其夏季降水影响的分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 309−317. [Lin Houbo, You Qinglong, Jiao Yang, et al. Water vapor transportation and its influences on precipitation in summer over Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(2): 309−317.]

[29] 周杰, 吴永萍, 封国林, 等. ERA-Interim 中的中国地区水分循环要素的时空演变特征分析[J]. 物理学报, 2013, 62(19): 199−202. [Zhou Jie, Wu Yongping, Feng Guolin, et al. Spatial and temporal characteristics of moisture cycle factors over China analyzed with ERA-Interim reanalysis data[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(19): 199−202.]

[30] Chen D L, Chen Hans W T. Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901−2010 [J]. Environmental Development, 2013, 6(1): 69−79.

[31] 范雪薇, 刘海隆, 赵文宇, 等. 基于NCEP资料新疆降水转化率的研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2016, 34(3): 372−378. [Fan Xuewei, Liu Hailong, Zhao Wenyu, et al. Analysis of precipitation conversion in Xinjiang based on NCEP data[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science Edition), 2016, 34(3): 372−378.]

[32] Chen F H, Chen J H, Holmes J, et al. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(7−8): 1055−1068.

[33] Peng D D, Zhou T J, Zhang L X. Moisture sources associated with precipitation during dry and wet seasons over Central Asia[J]. Journal of Climate, 2020, 33(24): 10755−10771.

[34] Xing W, Wang B. Predictability and prediction of summer rainfall in the arid and semiarid regions of China[J]. Climate Dynamics, 2017, 49(1−2): 419−431.

[35] 白庆梅. 亚洲干旱/半干旱区近几十年区域气候变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2010. [Bai Qingmei. Region Change of Asian Arid and Semiarid Area in Recent Years[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.]

[36] Yao J Q, Mao W Y, Yang Q, et al. Annual actual evapotranspiration in inland river catchments of China based on the Budyko framework[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2017, 31(6): 1409−1421.

[37] Jiang L L, Jiapaper G, Bao A M, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599−600: 967−980.

[38] 杨胜天, 于心怡, 丁建丽, 等. 中亚地区水问题研究综述[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 79 – 93. [Yang Shengtian, Yu Xinyi, Ding Jianli, et al. A review of water issues research in Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 79−93.]

[39] 赵勇, 杨青, 黄安宁, 等. 青藏和伊朗高原热力异常与北疆夏季降水的关系[J]. 气象学报, 2013, 71(4): 660−667. [Zhao Yong, Yang Qing, Huang Anning, et al. Relationships between the anomalies of surface sensible heat in the Tibetan Plateau and Iran Plateau and summertime precipitation in North Xinjiang[J]. Acta Meteorologic Sinica, 2013, 71(4): 660−667.]

[40] 赵勇, 李如琦, 杨霞, 等. 5月青藏高原地区感热异常对北疆夏季降水的影响[J]. 高原气象, 2013, 32(5): 1215−1223. [Zhao Yong, Li Ruqi, Yang Xia, et al. Impact of the anomaly of surface sensible heat in Qinghai-Xizang Plateaual and its surrounding areas on summertime precipitation in northern Xingjiang[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(5): 1215−1223.]

[41] 卢星, 赵勇, 王天竺. 新疆夏季降水的环流差异分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(1): 84−90. [Lu Xing, Zhao Yong, Wang Tianzhu. Analysis on the circulation differences of summer rainfall over Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(1): 84−90.]

Spatiotemporal evolution of atmospheric water cycle factors in arid regions of Central Asia under climate change

GAO Jie[1,2], ZHAO Yong[1], YAO Junqiang[2], Dilinuer TUOLIEWUBIEKE[2], WANG Mengyuan[3]

(1. School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China; 2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration/Key Laboratory of Tree-Ring Physical and Chemical Research, China Meteorological Administration/Xinjiang Key Laboratory of Tree-Ring Ecology, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. School of Atmospheric Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China)

Abstract: The arid regions of Central Asia, which are “upstream” of China in terms of their influence on weather and climate, are characterized by a general shortage of water resources and the fragility of ecosystems. The atmospheric water cycle is the key link in the transformation of water resources and ecosystems in this region. In this study, we reassessed the temporal and spatial variation of water cycle elements, such as atmospheric water vapor content, water vapor budget, precipitation, and actual evaporation, in the arid region and subregions of Central Asia, from 1979 to 2018. The results of our analysis show clear spatial differences in the water cycle elements of Central Asia. Precipitation and actual evaporation are high in mountainous areas, such as Tianshan Mountains and Pamir and surrounding oasis areas, and low in the desert plain areas, whereas atmospheric water vapor content shows an opposite pattern. In terms of temporal changes, from 1979 to 2018, the water vapor content in Central Asia showed a weak decreasing trend, with obvious regional differences in the rate of change. Water vapor content in the surrounding areas of the Aral Sea decreased significantly, whereas in most of the areas of the Xinjiang and Tianshan Mountains, it increased significantly. Zonal transport is the main mode of water vapor transport in Central Asia, compared with the relatively weak meridional transport. Large differences were found in the water vapor budget over different regions; the water vapor transport tended to decrease in the western and northern boundaries and increased in the eastern and southern boundaries. Water vapor revenue and expenditure showed an increasing trend in northwestern Central Asia, southern Central Asia, the Pamir Plateau, and the Tianshan Mountains and a decreasing trend in northern Central Asia and most of Xinjiang. In contrast to the change in water vapor transport, the precipitation in Central Asia increased from 1979 to 2018, with an increase of 4.14 mm·$(10a)^{-1}$ and a large interannual fluctuation. The significant increasing trend of precipitation is distributed in northern Central Asia and most of the Xinjiang and Tianshan Mountains, whereas there was a significant decreasing trend in northwestern and southern Central Asia. The actual evaporation in Central Asia showed a slight increasing trend, increasing significantly in the northern part of Central Asia, the Tianshan Mountains, and Pamir but decreasing significantly in the Caspian Sea area, Aral Sea, southern Central Asia, and southern Xinjiang. In terms of seasonal variation, the temporal and spatial distribution of seasonal and annual variations of water cycle elements was generally consistent. The results of our analysis contribute to a better understanding of the evolution and mechanism of the atmospheric water cycle in the arid regions of Central Asia.

Keywords: Central Asian arid region; water cycle; water vapor content; precipitation; actual evaporation; water vapor budget